



①9 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 199 30 087 A 1**

⑤1 Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**B 25 J 9/18**

②1 Aktenzeichen: 199 30 087.9  
②2 Anmeldetag: 30. 6. 1999  
④3 Offenlegungstag: 11. 1. 2001

DE 199 30 087 A 1

⑦1 Anmelder:  
Tassakos, Charalambos, Dr.-Ing., 52146 Würselen,  
DE

⑦4 Vertreter:  
Dreiss, Fuhlendorf, Steimle & Becker, 70188  
Stuttgart

⑦2 Erfinder:  
gleich Anmelder

⑤6 Entgegenhaltungen:

DE 196 15 069 A1  
EP 03 77 755 A1  
EP 01 04 270 A1  
WO 89 01 850 A1

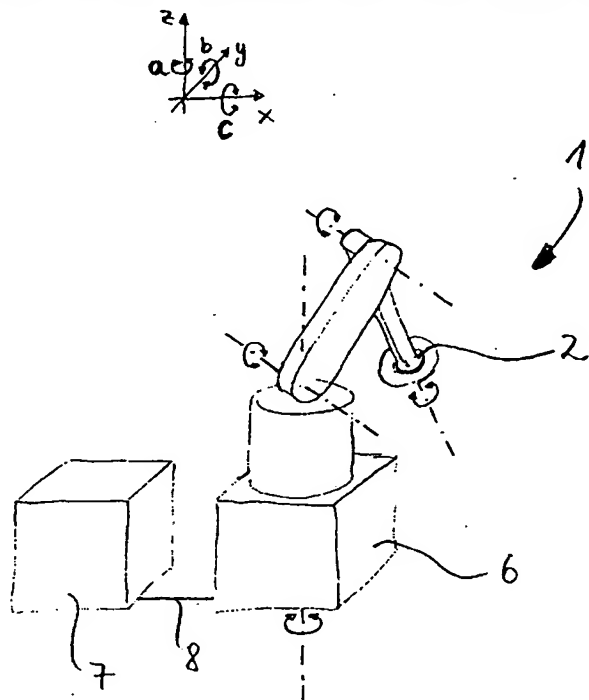
WEISS, L.E., SANDERSON, A.C., NEUMAN, Ch.P.:  
"Dynamic Sensor-Based Control of Robots with  
Visual Feedback" In: IEEE Journal of Robotics  
and Automation, Vol. RA-3, No. 5, October 1987,  
S. 404-417;

Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen

Prüfungsantrag gem. § 44 PatG ist gestellt

⑤4 Verfahren und Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines Manipulators eines Handhabungsgeräts

⑤7 Die Erfindung betrifft ein Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn. Um eine schnellere Regelung der Vorhalteposition zu ermöglichen, wird vorgeschlagen, dass mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators (2) entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.



DE 199 30 087 A 1

## Beschreibung

Die vorliegende Erfindung betrifft ein Verfahren und eine Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators eines Handhabungsgeräts relativ zu einem Objekt entlang einer Verfahrbahn. Die Erfindung betrifft außerdem ein Handhabungsgerät mit einem in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulator, dessen Vorhalteposition relativ zu einem Objekt regelbar ist.

Das Handhabungsgerät ist bspw. als ein mehrgelenkiger Industrie-Roboter ausgebildet. Derartige Industrie-Roboter werden insbesondere in der Automobilindustrie in der Fertigung und der Qualitätssicherung eingesetzt. Für die unterschiedlichen Einsatzmöglichkeiten eines Industrie-Roboters kann der Manipulator beliebig ausgebildet sein.

Der Manipulator ist bspw. als ein Werkzeug, insbesondere als ein Schweißgerät, als ein Gerät zum Auftragen von Klebstoff, von Farbe oder von anderen Beschichtungen auf eine Oberfläche, als ein Bearbeitungsgerät o. ä. ausgebildet. Zum Ergreifen eines oder mehrerer Objekte kann der Manipulator als ein Greifer, ein Saugnapf o. ä. ausgebildet sein. Schließlich ist es denkbar, dass der Manipulator als ein Messkopf z. B. zum Messen des Oberflächenverlaufs eines Objekts, einer Spaltbreite, eines Spaltversatzes, einer Schichtdicke o. ä. ausgebildet ist.

Damit der Manipulator die ihm zugedachte Aufgabe erfüllen kann, muss er in eine definierte Vorhalteposition relativ zu einem Objekt gebracht werden. Unter dem Begriff Vorhalteposition wird gemäß dem vorliegenden Patent sowohl die Positionierung als auch die Ausrichtung des Manipulators relativ zu dem Objekt verstanden.

Aus dem Stand der Technik sind Handhabungsgeräte bekannt, die eine interne Steuerungseinrichtung aufweisen. Auf der Steuerungseinrichtung ist ein Steuerungsprogramm lauffähig, durch das der Manipulator entlang einer programmierten Verfahrbahn in die Vorhalteposition bewegt werden kann. Wenn das Objekt stets an derselben Position angeordnet ist, reicht eine solche Steuerung der Verfahrbahn bis zur Vorhalteposition vollkommen aus. Falls die Position des Objekts jedoch gewissen Schwankungen unterworfen ist, was der Regelfall ist, kann durch eine Steuerung alleine nicht mehr sichergestellt werden, dass eine bestimmte Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt stets mit der erforderlichen Genauigkeit eingenommen wird. Schwankungen der Position des Objekts können vielerlei Ursachen haben.

Um sicherzustellen, dass die Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt auch bei Schwankungen der Position des Objekts stets mit der geforderten Genauigkeit eingenommen wird, ist es aus dem Stand der Technik ebenfalls bekannt, die Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt zu regeln. Aus dem Stand der Technik sind unterschiedliche Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators bekannt. Diese bekannten Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition sind jedoch sehr kompliziert und langsam.

Im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators relativ zu einem Objekt wird die Ist-Vorhalteposition des Manipulators zunächst mittels Sensoren erfasst und dann auf eine Soll-Vorhalteposition geregelt. Die Sensoren sind bspw. als optische oder als taktile Sensoren ausgebildet.

Insbesondere sind sie als Laser-Sensoren zum Messen von Abständen, als Kraft/Momenten-Sensoren zum Messen von Kräften bzw. Momenten oder als Berührungssensoren zur Detektion einer Berührung mit dem Objekt ausgebildet.

Die Sensoren sind in einem bestimmten Bezug (Position und Ausrichtung) zu dem Manipulator angeordnet. Vor der

Regelung der Vorhalteposition müssen die Sensoren in einen konkreten Bezug zu dem Manipulator und zu dem Objekt gebracht werden (Einrichten) und die Parameter der Regelung an den konkreten Bezug angepasst werden (Kalibrieren). Der Bezug der Sensoren zu dem Manipulator kann sich aufgrund von Temperaturschwankungen, mechanischen Einwirkungen auf die Sensoren oder den Manipulator, o. ä. verändern, wodurch ein erneutes Kalibrieren und u. U. sogar eine erneutes Einrichten der Vorrichtung zur Durchführung der Regelung notwendig wird. Während des Einrichtens und Kalibrierens steht die Vorrichtung nicht für eine Regelung zur Verfügung, die Regelung der Vorhalteposition muss unterbrochen werden.

Sämtliche bekannten Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators haben außerdem den Nachteil, dass die Verfahrensgeschwindigkeit des Manipulators relativ klein ist, da die Regelung in Unkenntnis der bevorstehenden, zu regelnden Verfahrbahn des Manipulators erfolgt. Deshalb muss die Verfahrensgeschwindigkeit so klein gewählt werden, dass auch im Extremfall einer Verfahrrichtungsumkehr eine rasche und genau Positionierung des Manipulators sichergestellt werden kann. Bei einer zu hohen Verfahrensgeschwindigkeit würde der Manipulator bei stark gekrümmten Verfahrbahnen oder einer Verfahrrichtungsumkehr aufgrund der Massenträgheit über die geregelte Verfahrbahn hinaus-schießen und somit die geregelte Verfahrbahn verlassen.

Es ist deshalb eine Aufgabe der vorliegenden Erfindung, ein Verfahren der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrensgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ausgehend von dem Verfahren der eingangs genannten Art vor, dass mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.

Erfindungsgemäß ist erkannt worden, dass die Regelung der Vorhalteposition durch eine vorausschauende Regelung auf einfache Weise entscheidend beschleunigt werden kann. Während der vorausschauenden Regelung der Vorhalteposition wird der bevorstehende Verlauf der Verfahrbahn berücksichtigt. Wenn der bevorstehende Verlauf der Verfahrbahn es zulässt, bspw. bei einer geraden oder einer nur geringfügig gekrümmten Verfahrbahn, kann die Verfahrensgeschwindigkeit des Manipulators hoch gewählt werden. Dadurch kann die Regelung der Vorhalteposition entlang einer Verfahrbahn entscheidend beschleunigt werden. Bei zunehmender Krümmung der bevorstehenden Verfahrbahn muss die Verfahrensgeschwindigkeit zunehmend reduziert werden. Durch die Wahl einer geringen Verfahrensgeschwindigkeit bei starken Krümmungen der bevorstehenden Verfahrbahn kann zudem die Genauigkeit der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang der Verfahrbahn entscheidend erhöht werden. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren kann die Verfahrensgeschwindigkeit somit dem Verlauf der bevorstehenden Verfahrbahn individuell angepasst werden.

Die Punkte der Ist-Verfahrbahn können auf unterschiedliche Weise, z. B. empirisch, simulativ oder durch Berechnung, bestimmt werden. Bei der empirischen Bestimmung der Punkte der Ist-Verfahrbahn können die einzelnen Punkte entweder mit dem Manipulator des Handhabungsgeräts manuell oder von einer ersten Steuereinrichtung gesteuert angefahren werden. Bei der simulativen Bestimmung der Punkte wird zunächst ein Modell des Handhabungsgeräts und des Objekts, vorzugsweise auf einem Computer, er-

stellt. Anhand dieses Modells wird dann durch Simulation der Verfahrbahn die Ist-Verfahrbahn bestimmt. Bei der mathematischen Berechnung der Punkte der Ist-Verfahrbahn wird zunächst ein mathematisches Modell des Handhabungsgeräts und des Objekts erstellt, und die Punkte werden dann durch Lösen mathematischer Gleichungen berechnet.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass die Ist-Verfahrbahn des Manipulators vor der Regelung der Vorhalteposition abgefahren wird und dabei die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert werden. Die Ist-Verfahrbahn muss nicht mit besonders hohen Anforderungen an die Genauigkeit abgefahren werden, da die Verfahrbahn im Rahmen der nachfolgenden Regelung der Verfahrbahn des Manipulators korrigiert werden kann. Die abgefahrte Ist-Verfahrbahn stellt lediglich eine Abschätzung des Verlaufs der Soll-Verfahrbahn dar und muss so genau sein, dass sie für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang der Verfahrbahn herangezogen werden kann.

Die Ist-Verfahrbahn wird vorteilhafterweise von dem Manipulator vor der Regelung der Vorhalteposition von einer internen Steuerungseinrichtung des Handhabungsgeräts gesteuert abgefahren. Auf der internen Steuerungseinrichtung läuft ein Steuerungsprogramm ab, in dem die einzelnen Punkte der Ist-Verfahrbahn programmiert sind. Das Steuerungsprogramm steuert das Handhabungsgerät derart an, dass der Manipulator während des Ablaufs des Steuerungsprogramms die Ist-Verfahrbahn abfährt. Dabei werden die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert. Außer den in dem Steuerungsprogramm programmierten Punkten der Ist-Verfahrbahn können noch zusätzliche Punkte der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und gespeichert werden.

Die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn werden vorzugsweise von einer externen Regelungseinrichtung aufgenommen und abgespeichert. Auf der externen Regelungseinrichtung läuft ein Regelungsprogramm ab, das die Vorhalteposition des Manipulators auf der Verfahrbahn regelt. Die externe Regelungseinrichtung ist bspw. als ein Personal Computer (PC) oder als ein Industrie-PC ausgebildet. Das Regelungsprogramm kann in einer Standard-Programmiersprache programmiert und ohne großen Aufwand umprogrammiert werden. In einem bestimmten Modus (Record-Mode) vor der Regelung der Vorhalteposition kann das Regelungsprogramm auch die Punkte der von dem Manipulator abgefahrenen Ist-Verfahrbahn aufnehmen und abspeichern. Die gespeicherten Punkte werden dann in einem anderen Modus (Operation-Mode) für die vorausschauende Regelung der Vorhalteposition herangezogen.

Gemäß einer anderen vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass die externe Regelungseinrichtung von der internen Steuerungseinrichtung aufgerufen wird. Das Steuerungsprogramm der internen Steuerungseinrichtung ist üblicherweise in einer proprietären, nur auf der Steuerungseinrichtung eines bestimmten Handhabungsgeräts lauffähigen Programmiersprache programmiert. Es wäre nur mit einem großen Aufwand möglich, das gesamte Regelungsprogramm in das Steuerungsprogramm zu integrieren. Deshalb sind in dem Steuerungsprogramm bestimmte Programmierbefehle (Aufrufbefehle, Rückholbefehle) vorgesehen, um das Regelungsprogramm der externen Regelungseinrichtung von dem Steuerungsprogramm aus aufzurufen. Das Einfügen dieser Programmierbefehle in das Steuerungsprogramm ist mit einem geringen Aufwand möglich. Je nach dem in welchem Modus die Regelung betrieben wird, werden durch einen Aufruf des Regelungsprogramms der Regelungseinrichtung die

Punkte der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und gespeichert (Record-Mode) oder die Vorhalteposition vorausschauend geregelt (Operation-Mode).

In einer anderen vorteilhaften Weiterbildung der Erfindung wird vorgeschlagen, dass vor der Regelung der Vorhalteposition die Soll-Vorhalteposition des Manipulators angefahren wird, während einer Veränderung der Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad Messdaten, durch die die Vorhalteposition des Manipulators charakterisiert ist, aufgenommen und gespeichert werden und die Regelung der Vorhalteposition in Abhängigkeit von den Messdaten durchgeführt wird. Zwischen den aufgenommenen Messdaten und der Position des Manipulators besteht ein Zusammenhang. Somit sind in den aufgenommenen Messdaten Informationen über die Position des Manipulators enthalten.

Die Soll-Vorhalteposition wird in einem weiteren Modus (Parameter-Mode) vor der Regelung der Vorhalteposition angefahren. Zum Anfahren der Soll-Vorhalteposition im Parameter-Mode werden die im Record-Mode gespeicherten Punkte der Ist-Verfahrbahn herangezogen. Sobald die Soll-Vorhalteposition erreicht ist, beginnt eine Trainingsphase; in der für die spätere, im Rahmen des Operation-Mode durchgeführte Regelung der Vorhalteposition benötigte Informationen ermittelt werden.

Während der Trainingsphase wird der Manipulator um die Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad in unterschiedliche Vorhaltepositionen relativ zu dem Objekt bewegt. Der Manipulator wird um jeden Freiheitsgrad in Vorhaltepositionen bewegt, die vorzugsweise zu beiden Seiten der Soll-Vorhalteposition liegen. Die Vorhaltepositionen des Manipulators werden durch Sensoren ermittelt, die vorzugsweise an dem Manipulator befestigt sind. Die Sensoren liefern Messdaten anhand derer eine Vorhalteposition des Manipulators charakterisiert ist. Die Messdaten sind bspw. die Abstände von den Sensoren zu dem Objekt, Kräfte oder Momente, die von dem Objekt auf die Sensoren einwirken. Die Messdaten können auch Bildmessdaten sein. Bildmessdaten werden durch Vermessen von Bildern gewonnen, die von einer CCD-Kamera o. ä. aufgenommen wurden. Im Rahmen der Trainingsphase werden die Messdaten für jeden der Freiheitsgrade für jede der Vorhaltepositionen aufgenommen. Es ist denkbar, dass die gespeicherten Messdaten für die Regelung der Vorhalteposition weiterverarbeitet werden. Dann ist die Trainingsphase für diese Soll-Vorhalteposition abgeschlossen. Der Manipulator kann eine weitere Soll-Vorhalteposition anfahren und für diese Soll-Vorhalteposition eine weitere Trainingsphase durchlaufen, bis alle Soll-Vorhaltepositionen angefahren worden sind. Dann ist der Parameter-Mode abgeschlossen. Die spätere, im Rahmen des Operation-Mode durchgeführte Regelung der Vorhalteposition wird in Abhängigkeit von den gespeicherten Messdaten durchgeführt.

Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren ersetzt die Trainingsphase das bei herkömmlichen, aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zum Regeln der Vorhalteposition des Manipulators eines Handhabungsgeräts notwendige Einrichten (Positionierung der Sensoren relativ zu dem Objekt) und Kalibrieren (Einstellen der Parameter der Regelung).

Auch bei diesem Verfahren, bei dem vor der Regelung der Vorhalteposition eine Trainingsphase durchlaufen wird, werden mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen. Das Durchlaufen einer Trainingsphase vor der Regelung der Vorhalteposition hat die angegebenen Vorteile aber auch ohne diese Merkmale des Kennzeichens des Patentanspruchs 1. Der Schutz des

Patents soll sich deshalb auch auf ein Verfahren der zuletzt genannten Art beziehen, bei dem die im Kennzeichen des Patentanspruchs 1 genannten Merkmale fehlen.

Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass vor der Regelung der Vorhalteposition

- die Soll-Vorhalteposition angefahren wird,
- ein Soll-Messvektor mit den Messdaten aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad der Manipulator des Handhabungsgeräts aus der Soll-Vorhalteposition heraus in mehrere Vorhaltepositionen bewegt und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad für dieselben Messdaten der Messvektoren der Betrag des Gradienten ermittelt und in einer Gradientenmatrix gespeichert wird, und im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition
- ein Korrekturvektor aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix mit der Differenz des Soll-Messvektors und eines Ist-Messvektors in der Ist-Vorhalteposition des Manipulators oder anhand eines anderen geeigneten Verfahrens ermittelt wird und
- die Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor geregelt wird.

Gemäß dieser bevorzugten Ausführungsform werden in der Trainingsphase im Parameter-Mode die für die Soll-Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten in einem Soll-Messvektor und die Messdaten, die für im Rahmen der Trainingsphase angefahrte Vorhaltepositionen aufgenommen wurden, in Messvektoren gespeichert. Für jeden Freiheitsgrad, um den der Manipulator bewegbar ist, werden also von der Soll-Vorhalteposition aus mehrere Vorhaltepositionen in jede Richtung angefahren und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen. Die Dimension der Messvektoren entspricht der Anzahl der für jede Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten. Die Dimension aller Messvektoren ist gleich groß.

Für jeden Freiheitsgrad werden die Messvektoren und der Soll-Messvektor dann weiterverarbeitet. Aus denselben Messdaten der Messvektoren eines Freiheitsgrades wird der Betrag des Gradienten ermittelt und in einer Gradientenmatrix gespeichert. Die Gradientenmatrix hat somit die Dimensionen (Anzahl der für jede Vorhalteposition aufgenommenen Messdaten)  $\times$  (Anzahl der Freiheitsgrade). Es ist denkbar, den Kehrwert der Gradientenmatrix bereits in dem Parameter-Mode zu berechnen und abzuspeichern. Vorzugsweise wird er aber erst in dem nachfolgenden Operation-Mode berechnet. Damit ist die Trainingsphase für diese Soll-Vorhalteposition abgeschlossen. Die Gradientenmatrix kann auch als Jakobimatrix oder als Sensibilitätsmatrix bezeichnet werden.

Im Rahmen des Operation-Mode wird dann für die Regelung der Vorhalteposition des Manipulators ein Ist-Messvektor ermittelt, d. h. es werden die Messdaten in der momentanen Vorhalteposition des Manipulators des Handhabungsgeräts ermittelt und in dem Ist-Messvektor gespeichert. Dann wird ein Differenzvektor aus der Differenz des Soll-Messvektors und des Ist-Messvektors gebildet. Des Weiteren wird der Kehrwert der Gradientenmatrix berechnet und wahlweise abgespeichert.

Schließlich wird ein Korrekturvektor aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix mit dem Differenzvektor berechnet und die Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor geregelt.

Der Korrekturvektor kann auch mittels eines anderen geeigneten Verfahrens bestimmt werden, bspw. durch den Ein-

satz eines sequentiellen Kalmanfilters. Derartige geeignete Verfahren zum Berechnen des Korrekturvektors sind aus dem Stand der Technik bekannt und können von einem Fachmann nach Belieben eingesetzt werden. Diese anderen geeigneten Verfahren haben den Vorteil, dass auf eine relativ aufwendige Bildung des Kehrwerts der Gradientenmatrix verzichtet werden kann.

Während des Operation-Mode fährt der Manipulator zunächst die Verfahrbahn gemäß den während des Record-Mode gespeicherten Punkten ab. Diese Verfahrbahn wird dann im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition des Manipulators mit Hilfe des Korrekturvektors korrigiert. Bei dem erfindungsgemäßen Verfahren wird die Vorhalteposition also nicht absolut, sondern lediglich relativ zu einer Vorhalteposition auf der gespeicherten Verfahrbahn geregelt.

Vorteilhafterweise wird die Ist-Vorhalteposition im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition um einen Bruchteil des Korrekturvektors korrigiert und anschließend der Ist-Messvektor in der korrigierten Ist-Vorhalteposition und daraus der Korrekturvektor erneut ermittelt. Die Ist-Vorhalteposition wird also nicht um den gesamten Korrekturvektor korrigiert. Um ein Überspringen der Regelung zu verhindern, wird vielmehr versucht, sich der Soll-Vorhalteposition langsam von einer Richtung her anzunähern. Dadurch wird eine Regelung mit einem gedämpften Einschwingverhalten realisiert. Durch eine geeignete Wahl des Bruchteils des Korrekturvektors kann die Dämpfungskonstante der Regelung bestimmt werden.

Die Regelung der Vorhalteposition wird vorzugsweise abgebrochen, wenn jedes der Elemente des Korrekturvektors kleiner als ein Abbruchkriterium ist. Durch eine geeignete Wahl des Abbruchkriteriums kann einerseits die Genauigkeit der Regelung und andererseits die Regelungsgeschwindigkeit bestimmt werden. Je kleiner der Wert des Abbruchkriteriums gewählt wird, desto genauer kann die Regelung der Vorhalteposition durchgeführt werden. Ein kleiner Wert des Abbruchkriteriums bedeutet jedoch auch, dass die Regelung mehr Zeit benötigt, bis das Abbruchkriterium erfüllt ist.

Um eine Regelbarkeit der Vorhalteposition des Manipulators innerhalb eines bestimmten Arbeitsvolumens der Regelung sicherzustellen, sollten die aufgenommenen Messvektoren nach Möglichkeit das gesamte Arbeitsvolumen abdecken. Des Weiteren sollten für jeden Freiheitsgrad so viele Messvektoren aufgenommen werden, dass eine zuverlässige Berechnung des Betrags des Gradienten der Messdaten möglich ist. Deshalb wird gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der Erfindung vorgeschlagen, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus mindestens zwei Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden. Vorteilhafterweise werden jedoch für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus fünf Messvektoren in jede Richtung aufgenommen. Somit ergeben sich für jeden Freiheitsgrad zehn Messvektoren und der Soll-Messvektor, also elf Messvektoren. Für jedes der aufgenommenen und in den Messvektoren gespeicherte Messdatum wird dann der Betrag des Gradienten berechnet und in der Gradientenmatrix abgespeichert.

Die Messvektoren müssen zusammen für jeden Freiheitsgrad, in dem die Vorhalteposition des Manipulators des Handhabungsgeräts geregelt wird, mindestens ein unabhängiges Messdatum enthalten. Gemäß einer weiteren bevorzugten Ausführungsform der Erfindung wird vorgeschlagen, dass die Messvektoren zusammen mindestens sechs Messdaten enthalten. Dadurch kann die Position und Ausrichtung des Manipulators relativ zu dem Objekt in sechs Freiheitsgraden eindeutig charakterisiert werden. Damit kann die

Vorhalteposition des Manipulators um sechs Freiheitsgrade im dreidimensionalen Raum geregelt werden. Vorzugsweise enthalten die Messvektoren jeweils 32 Messdaten.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht darin, eine Vorrichtung der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrensgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrenbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ausgehend von der Vorrichtung der eingangs genannten Art vor, dass die Vorrichtung Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist.

Eine weitere Aufgabe der vorliegenden Erfindung besteht schließlich darin, ein Handhabungsgerät der eingangs genannten Art dahingehend auszugestalten und weiterzubilden, dass eine möglichst schnelle Regelung der Vorhalteposition erreicht und dass insbesondere höhere Verfahrensgeschwindigkeiten des Manipulators auf der Verfahrenbahn realisiert werden können, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Zur Lösung dieser Aufgabe schlägt die Erfindung ausgehend von dem Handhabungsgerät der eingangs genannten Art vor, dass das Handhabungsgerät Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist.

Die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Handhabungsgerät weisen insbesondere Mittel auf, um in einem Record-Mode mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrenbahn zu speichern und die gespeicherten Punkte dann in einem Operation-Mode für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators entlang dieses Teils der Verfahrenbahn heranzuziehen. Des Weiteren weisen die erfindungsgemäße Vorrichtung und das erfindungsgemäße Handhabungsgerät Mittel auf, um in einem Parameter-Mode im Rahmen einer Trainingsphase den Manipulator in eine Soll-Vorhalteposition zu fahren, um den Manipulator um die einzelnen Freiheitsgrade des Handhabungsgeräts in andere Vorhaltepositionen zu verfahren und für jeden Freiheitsgrad in jeder Vorhalteposition die Messdaten aufzunehmen und zu speichern, durch die die entsprechende Vorhalteposition charakterisiert ist.

Bei der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Handhabungsgerät kann die Verfahrensgeschwindigkeit des Manipulators aufgrund der vorausschauenden Regelung besonders groß gewählt werden. Außerdem ersetzt die Trainingsphase das Einrichten und Kalibrieren der Sensoren. Mit der erfindungsgemäßen Vorrichtung und dem erfindungsgemäßen Handhabungsgerät ist somit eine schnellere Regelung der Vorhalteposition möglich, ohne dass es zu einem Verlust an Regelungsgenauigkeit kommt.

Gemäß einer vorteilhaften Weiterbildung der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass an dem Manipulator des Handhabungsgeräts zur Ermittlung der Ist-Vorhalteposition des Manipulators relativ zu dem Objekt mindestens ein Sensor befestigt ist.

Der oder jeder Sensor ist vorteilhafterweise derart relativ zu dem Objekt angeordnet, dass die Folge der Messdaten streng monoton ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung, um den Manipulator aus allen Positionen und Ausrichtungen relativ zu dem Objekt stets in die gewünschte Soll-Vorhalteposition regeln zu können.

Des Weiteren muss die Beobachtbarkeit der Regelung sichergestellt sein. Deshalb wird gemäß einer anderen vorteilhaften Ausführungsform der Erfindung vorgeschlagen, dass

der oder jeder Sensor derart relativ zu dem Objekt angeordnet ist, dass in der Gradientenmatrix für jeden Freiheitsgrad jeweils für mindestens einen aufgenommenen Messdaten ein Gradienten-Betragswert enthalten ist.

5 Damit die in der Gradientenmatrix im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition auch verarbeitet werden können, und zu einem zuverlässigen Ergebnis führen, wird vorgeschlagen, dass der oder jeder Sensor derart relativ zu dem Objekt angeordnet ist, dass die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix signifikant sind. Man spricht von signifikanten Gradienten-Betragswerten, wenn diese von dem Messrauschen der aufgenommenen Messdaten unterscheidbar sind. Die Gradienten-Betragswerte sind bspw. unterscheidbar, wenn sie etwa doppelt so groß sind wie das Messrauschen der aufgenommenen Messdaten. Falls die Gradientenstärke nicht ausreichend groß ist, wird der entsprechende Gradienten-Betragswert als nicht vorhanden gewertet. Die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix sind vorzugsweise in etwa mindestens dreimal so groß wie das Messrauschen.

Die Kriterien der Monotonie der Folge der Messdaten, der Beobachtbarkeit der Regelung und der Gradientenstärke können durch die Position der Sensoren relativ zu dem Manipulator beeinflusst werden. Der genaue Bezug der Sensoren zu dem Manipulator ist allerdings von untergeordneter Bedeutung, solange die o. g. Kriterien erfüllt sind. Der Bezug der Sensoren zu dem Manipulator wird während der Trainingsphase erfasst und über die aufgenommenen und abgespeicherten Messdaten in der Regelung berücksichtigt.

30 Gemäß einer bevorzugten Ausführungsform der vorliegenden Erfindung wird vorgeschlagen, dass der oder jeder Sensor als ein optischer Sensor, insbesondere als eine CCD-Kamera, ausgebildet ist. Mittels CCD-Kameras kann ein Objekt auf vielfältige Weise charakterisiert werden. Es ist denkbar, dass die Messdaten bei als CCD-Kameras ausgebildeten Sensoren als Abstände zwischen den Sensoren und dem Objekt, als Pixel auf dem CCD-Chip o. ä. ausgebildet sind. CCD-Kameras haben zudem den Vorteil, dass ihr Blickfeld zum Ausrichten der Sensoren relativ zu dem Objekt auf einem Bildschirm dargestellt werden kann. Das erleichtert die Ausrichtung der Sensoren erheblich.

Ein bevorzugtes Ausführungsbeispiel der vorliegenden Erfindung wird im Folgenden anhand der Zeichnung näher erläutert. Es zeigt:

45 Fig. 1 ein erfindungsgemäßes Handhabungsgerät gemäß einer bevorzugten Ausführungsform;

Fig. 2 den Manipulator des Handhabungsgeräts aus Fig. 1 im Ausschnitt; und

Fig. 3 eine Verfahrenbahn eines erfindungsgemäßen Handhabungsgeräts.

50 In Fig. 1 ist ein erfindungsgemäßes Handhabungsgerät in seiner Gesamtheit mit dem Bezugszeichen 1 gekennzeichnet. Das Handhabungsgerät 1 weist einen Manipulator 2 auf, der in sechs Freiheitsgraden (x, y, z, a, b, c) bewegbar ist. Das Handhabungsgerät 1 ist bspw. als ein Industrie-Roboter ausgebildet, dessen Manipulator 2 bspw. als ein beliebiges Werkzeug oder als ein Messkopf zur Aufnahme beliebiger Messgrößen (Temperatur, Abstand, etc.) ausgebildet ist.

60 Damit der Manipulator 2 die ihm zugedachte Aufgabe erfüllen kann, muss er in eine definierte Vorhalteposition (vgl. Fig. 2) relativ zu einem Objekt 3 gebracht werden. Unter dem Begriff Vorhalteposition wird gemäß dem vorliegenden Patent auch die Ausrichtung des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 verstanden. Die Erfindung schlägt ein Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition vor. Das erfindungsgemäße Verfahren kann nicht nur für jede Art von Pick-and-place-Anwendungen, sondern auch für Anwendungen, bei denen einem bestimmten Linienverlauf gefolgt werden

muss, bspw. zum Schweißen, Kleben oder Abdichten von Kanten, eingesetzt werden.

Gemäß dem vorliegenden Ausführungsbeispiel soll ein Schiebedach 4 eines Kraftfahrzeugs von dem Manipulator 2 ergriffen und in eine entsprechende Öffnung (Objekt 3) im Dach 5 der Karosserie des Kraftfahrzeugs eingesetzt werden. Der Manipulator 2 ist als ein Saugnapf zum Greifen des Schiebedachs 4 ausgebildet. Die Vorhalteposition ist eine Position oberhalb der Öffnung, von der aus das Schiebedach 4 in einer geradlinigen, senkrechten Bewegung nach unten in die Öffnung bewegt werden kann.

Das Handhabungsgerät 1 weist eine interne Steuerungseinrichtung 6 auf. Auf der Steuerungseinrichtung 6 ist ein Steuerungsprogramm lauffähig, durch das der Manipulator 2 entlang einer programmierten Verfahrbahn (vgl. Fig. 3) in die Vorhalteposition bewegt werden kann. Wenn das Objekt 3, im vorliegenden Ausführungsbeispiel die Öffnung im Dach 5 der Karosserie des Kraftfahrzeugs, stets an derselben Position angeordnet ist, reicht eine solche Steuerung der Verfahrbahn bis zur Vorhalteposition vollkommen aus. Falls die Position des Objekts 3 jedoch gewissen Schwankungen unterworfen ist, kann durch eine Steuerung alleine nicht mehr sichergestellt werden, dass eine bestimmte Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 stets mit der erforderlichen Genauigkeit eingenommen wird. Schwankungen des Objekts 3 können sich bspw. aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Positionierung der Karosserie relativ zu dem Handhabungsgerät 1 oder aufgrund der Bewegung der Karosserie des Kraftfahrzeugs auf einer Fertigungsstraße ergeben.

Um sicherzustellen, dass die Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 auch bei Schwankungen der Position des Objekts 3 stets mit der geforderten Genauigkeit eingenommen wird, wird in solchen Fällen die Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 geregelt. Aus dem Stand der Technik sind mehrere Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 bekannt. Diese Verfahren sind jedoch sehr arbeits- und zeitaufwendig.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 weist verschiedene Merkmale zur Beschleunigung und Vereinfachung der Regelung auf. Das Verfahren ist auf einer externen Regelungseinrichtung 7 implementiert (vgl. Fig. 1). Die Regelungseinrichtung 7 ist als ein herkömmlicher Personal-Computer (PC) oder Industrie-PC ausgebildet. Auf der Regelungseinrichtung 7 ist ein Regelungsprogramm, das in einer herkömmlichen Programmiersprache programmiert ist, lauffähig. In Fig. 1 ist die Regelungseinrichtung 7 als von dem Handhabungsgerät 1 getrennt ausgebildet. Es ist jedoch auch denkbar, dass die Regelungseinrichtung 7 in das Handhabungsgerät 1 integriert ist. Das Steuerungsprogramm der Steuerungseinrichtung 6 ist in einer proprietären, nur auf der Steuerungseinrichtung 6 dieses Handhabungsgeräts 1 lauffähigen Programmiersprache programmiert. Das Steuerungsprogramm weist an bestimmten Stellen Programmierbefehle (Aufrufbefehle, Rückholbefehle) auf, um das Regelungsprogramm der externen Regelungsvorrichtung 7 von dem Steuerungsprogramm aus aufzurufen bzw. um von dem Regelungsprogramm wieder zu dem Steuerungsprogramm zurückzukehren. Zwischen der Steuerungseinrichtung 6 und der Regelungseinrichtung 7 ist eine Datenleitung 8 zum Austausch von Daten vorgesehen.

In Fig. 2 ist zu erkennen, dass an dem Manipulator 2 vier als CCD-Kameras ausgebildete Sensoren 9 angeordnet sind. Durch die Sensoren 9 werden die Verläufe der Kanten 10 in Relation zu dem Manipulator 2 gesetzt. Dazu werden Messdaten, die im vorliegenden Ausführungsbeispiel als Pixel-

werte der CCD-Chips der Sensoren 9 ausgebildet sind, aufgenommen und in Messvektoren gespeichert.

Das erfindungsgemäße Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition des Manipulators 2 relativ zu dem Objekt 3 weist drei unterschiedliche Betriebszustände auf. In einem ersten Betriebszustand, dem sog. Record-Mode, wird die Verfahrbahn A bis B (vgl. Fig. 3) zu einer Vorhalteposition hin und von der Vorhalteposition weg von dem Steuerungsprogramm der Steuerungseinrichtung 6 gesteuert abgefahren. In dem Bereich der Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D liegt ein für die Regelung interessanter Bereich mit einem oder mehreren Vorhaltepositionen des Manipulators 2, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden sollen. Wenn der Manipulator 2 beim Abfahren der Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm der Regelungseinrichtung 7 aufgerufen. Während des gesteuerten Abfahrens der Verfahrbahn von dem Punkt C bis D werden dann einer oder mehrere Punkte von dem Regelungsprogramm aufgenommen und gespeichert. Wenn die Verfahrbahn den Punkt D erreicht hat, wird das Regelungsprogramm beendet. Damit ist der Record-Mode beendet. Auf die gespeicherten Punkte der Verfahrbahn wird dann in einem dritten Betriebszustand der Regelung zugegriffen.

In einem zweiten Betriebszustand, dem sog. Parameter-Mode, fährt der Manipulator 2 von dem Steuerungsprogramm gesteuert die Verfahrbahn von dem Punkt A zu dem Punkt C ab. Wenn die Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm aufgerufen, und die Steuerung des Manipulators 2 wird von dem Steuerungsprogramm an das Regelungsprogramm abgegeben. Das Regelungsprogramm fährt die gespeicherte Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D ab. Auf der Verfahrbahn werden diejenigen Vorhaltepositionen angefahren, die relativ zu dem Objekt geregelt werden sollen, und für jede Vorhalteposition wird eine Trainingsphase durchlaufen. Wenn die von dem Regelungsprogramm gesteuerte Verfahrbahn den Punkt D erreicht hat, wird das Regelungsprogramm beendet und die Steuerung des Manipulators 2 entlang der Verfahrbahn wieder an das Steuerungsprogramm zurückgegeben. Der Manipulator 2 fährt dann von dem Steuerungsprogramm gesteuert die restliche Verfahrbahn von dem Punkt D bis B ab. Damit ist der Parameter-Mode beendet.

Für jede Vorhalteposition, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden soll, wird eine Trainingsphase durchgeführt. Dazu wird zunächst die Soll-Vorhalteposition mit dem Manipulator 2 angefahren, und von den Sensoren 9 werden die Werte von 32 Messdaten, durch die die Soll-Vorhalteposition charakterisiert ist, aufgenommen und in einem Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  gespeichert. Der Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  hat somit die Dimension  $32 \times 1$  (32 Messdaten  $\times$  1 Wert). Anschließend wird der Manipulator 2 nacheinander um jeden der sechs Freiheitsgrade in fünf Vorhaltepositionen in der einen Richtung der Soll-Vorhalteposition und in fünf Vorhaltepositionen in der anderen Richtung der Soll-Vorhalteposition bewegt. In jeder Vorhalteposition werden die entsprechenden Werte der 32 Messdaten aufgenommen und in Messvektoren gespeichert. Aus den zehn Messvektoren und dem Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  wird dann für jeden der sechs Freiheitsgrade der Betrag des Gradienten eines bestimmten Messdatums berechnet und in einer Gradientenmatrix C abgespeichert. Die Gradientenmatrix C hat somit die Dimension  $32 \times 6$  (32 Messdaten  $\times$  6 Freiheitsgrade). Für jeden der zu regelnden Vorhaltepositionen erhält man somit einen Soll-Messvektor  $y_{\text{soll}}$  und die Gradientenmatrix C.

In einem dritten Betriebszustand, dem sog. Operation-Mode, fährt der Manipulator 2 von dem Steuerungsprogramm gesteuert die Verfahrbahn von dem Punkt A zu dem



Punkt C ab. Wenn die Verfahrbahn den Punkt C erreicht hat, wird das Regelungsprogramm aufgerufen, und die Steuerung des Manipulators 2 wird von dem Steuerungsprogramm an das Regelungsprogramm abgegeben. Das Regelungsprogramm fährt die gespeicherte Verfahrbahn zwischen den Punkten C und D ab. Die gespeicherten Punkte der Verfahrbahn erlauben eine vorausschauende Regelung der Vorhaltepunkte auf der Verfahrbahn, was bei gleicher oder sogar höherer Genauigkeit eine wesentlich höhere Verfahrbahngeschwindigkeit als bei den aus dem Stand der Technik bekannten Verfahren zum Regeln der Vorhalteposition eines Manipulators ermöglicht.

In dem Bereich der Verfahrbahn zwischen den Punkten E und F liegt ein für die Regelung interessanter Bereich mit einem oder mehreren Vorhaltepositionen des Manipulators 2, die relativ zu dem Objekt 3 geregelt werden sollen. Sobald die Verfahrbahn den Punkt E erreicht hat, erfolgt eine Regelung der Vorhalteposition auf der Verfahrbahn. Im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition werden von den Sensoren 9 zunächst in der momentanen Ist-Vorhalteposition die entsprechenden Werte der Messdaten aufgenommen und in einem Ist-Messvektor  $y_{ist}$  gespeichert. Der Ist-Messvektor  $y_{ist}$  hat ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$  (32 Messdaten  $\times$  1 Wert). Aus der Differenz des Soll-Messvektors und des Ist-Messvektors wird ein Differenz-Messvektor  $D_y$  gebildet ( $D_y = y_{soll} - y_{ist}$ ). Der Differenz-Messvektor  $D_y$  hat ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$ . Dann wird der Kehrwert der Gradientenmatrix C berechnet und wahlweise abgespeichert. Aus dem Produkt des Kehrwerts des Gradientenvektors C und des Differenz-Messvektors  $D_y$  wird ein Korrekturvektor  $D_x$  ermittelt, der ebenfalls die Dimension  $32 \times 1$  hat. Es ist jedoch auch denkbar, dass der Korrekturvektor  $D_x$  mittels eines anderen geeigneten Verfahrens, bspw. durch den Einsatz eines sequentiellen Kalmanfilters, ermittelt wird.

Ein Teil des Korrekturvektors  $D_x$ , vorzugsweise etwa 10% des Korrekturvektors  $D_x$ , wird zur Korrektur der Ist-Vorhalteposition des Manipulators 2 herangezogen. In der neuen Ist-Vorhalteposition werden erneut die entsprechenden Werte der Messdaten aufgenommen und in einem Ist-Messvektor  $y_{ist}$  gespeichert. Wie oben bereits beschrieben wird erneut ein Korrekturvektor  $D_x$  berechnet und die Ist-Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor  $D_x$  korrigiert. Die Korrektur der Ist-Vorhalteposition wird so lange wiederholt, bis die einzelnen Werte des Korrekturvektors  $D_x$  ein bestimmtes Abbruchkriterium erfüllt haben, d. h. bis der Manipulator 2 auf die Soll-Vorhalteposition geregelt ist.

#### Patentansprüche

1. Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, **dadurch gekennzeichnet**, dass mehrere Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn gespeichert sind und für eine vorausschauende Regelung der Vorhalteposition des Manipulators (2) entlang dieses Teils der Verfahrbahn herangezogen werden.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Verfahrbahn des Manipulators (2) vor der Regelung der Vorhalteposition abgefahren wird und dabei die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn aufgenommen und abgespeichert werden.
3. Verfahren nach Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Verfahrbahn von dem Manipulator (2) vor der Regelung der Vorhalteposition von einer inter-

nen Steuerungseinrichtung (6) des Handhabungsgeräts (1) gesteuert abgefahren wird.

4. Verfahren nach Anspruch 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, dass die Punkte zumindest eines Teils der Ist-Verfahrbahn von einer externen Regelungseinrichtung (7) aufgenommen und abgespeichert werden.

5. Verfahren nach Anspruch 3 und 4, dadurch gekennzeichnet, dass die externe Regelungseinrichtung (7) von der internen Steuerungseinrichtung (6) aufgerufen wird.

6. Verfahren zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Soll-Vorhalteposition des Manipulators (2) vor der Regelung der Vorhalteposition angefahren wird, während einer Veränderung der Soll-Vorhalteposition um jeweils einen Freiheitsgrad Messdaten, durch die die Vorhalteposition des Manipulators (2) charakterisiert ist, aufgenommen und gespeichert werden und die Regelung der Vorhalteposition in Abhängigkeit von den Messdaten durchgeführt wird.

7. Verfahren nach Anspruch 6, dadurch gekennzeichnet, dass vor der Regelung der Vorhalteposition

- die Soll-Vorhalteposition angefahren wird,
- ein Soll-Messvektor ( $y_{soll}$ ) mit den Messdaten aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad der Manipulator (2) des Handhabungsgeräts (1) aus der Soll-Vorhalteposition heraus in mehrere Vorhaltepositionen bewegt und in jeder Vorhalteposition ein Messvektor aufgenommen wird,
- für jeden Freiheitsgrad für dieselben Messdaten der Messvektoren der Betrag des Gradienten ermittelt und in einer Gradientenmatrix (C) gespeichert wird, und im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition
- ein Korrekturvektor ( $D_x$ ) aus der Multiplikation des Kehrwerts der Gradientenmatrix (C) mit der Differenz des Soll-Messvektors ( $y_{soll}$ ) und eines Ist-Messvektors ( $y_{ist}$ ) in der Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) oder anhand eines anderen geeigneten Verfahrens ermittelt wird und
- die Vorhalteposition in Abhängigkeit von dem Korrekturvektor ( $D_x$ ) geregelt wird.

8. Verfahren nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, dass die Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) im Rahmen der Regelung der Vorhalteposition um einen Bruchteil des Korrekturvektors ( $D_x$ ) korrigiert wird und anschließend der Ist-Messvektor ( $y_{ist}$ ) in der korrigierten Ist-Vorhalteposition und daraus der Korrekturvektor ( $D_x$ ) erneut ermittelt wird.

9. Verfahren nach Anspruch 8, dadurch gekennzeichnet, dass die Regelung der Vorhalteposition abgebrochen wird, wenn jedes der Elemente des Korrekturvektors ( $D_x$ ) kleiner als ein Abbruchkriterium ist.

10. Verfahren nach Anspruch 8 oder 9, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus mindestens zwei Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden.

11. Verfahren nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, dass für jeden Freiheitsgrad von der Soll-Vorhalteposition aus fünf Messvektoren in jede Richtung aufgenommen werden.

12. Verfahren nach einem der Ansprüche 1 bis 5, dadurch gekennzeichnet, dass die Messvektoren zusammen mindestens sechs Messdaten enthalten, damit die

Position und Ausrichtung des Manipulators (2) relativ zu dem Objekt (3) im dreidimensionalen Raum charakterisiert ist.

13. Verfahren nach Anspruch 12, dadurch gekennzeichnet, dass die Messvektoren jeweils 32 Messdaten 5  
enthalten.

14. Vorrichtung zur Regelung der Vorhalteposition eines in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulators (2) eines Handhabungsgeräts (1) relativ zu einem Objekt (3) entlang einer Verfahrbahn, dadurch gekennzeichnet, dass die Vorrichtung Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist. 10

15. Handhabungsgerät (1) mit einem in mehreren Freiheitsgraden bewegbaren Manipulator (2), dessen Vorhalteposition relativ zu einem Objekt (3) regelbar ist, dadurch gekennzeichnet, dass das Handhabungsgerät (9) Mittel zur Durchführung des Verfahrens nach einem der Ansprüche 1 bis 13 aufweist. 15

16. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 15, dadurch gekennzeichnet, dass an dem Manipulator (2) des Handhabungsgeräts (1) zur Ermittlung der Ist-Vorhalteposition des Manipulators (2) relativ zu dem Objekt (3) mindestens ein Sensor (9) befestigt ist. 20

17. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) derart relativ zu dem Objekt (3) angeordnet ist, dass die Folge der Messdaten der für einen Freiheitsgrad aufgenommenen Messvektoren streng monoton ist. 25

18. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 17, dadurch gekennzeichnet, dass in der Gradientenmatrix (C) für jeden Freiheitsgrad jeweils für mindestens ein aufgenommenes Messdatum ein Gradienten-Betragswert enthalten ist. 30

19. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 18, dadurch gekennzeichnet, dass die Gradienten-Betragswerte in der Gradientenmatrix (C) signifikant sind. 35

20. Handhabungsgerät (1) nach einem der Ansprüche 15 bis 19, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) als ein optischer Sensor ausgebildet ist. 40

21. Handhabungsgerät (1) nach Anspruch 20, dadurch gekennzeichnet, dass der oder jeder Sensor (9) als eine CCD-Kamera ausgebildet ist. 45

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

45

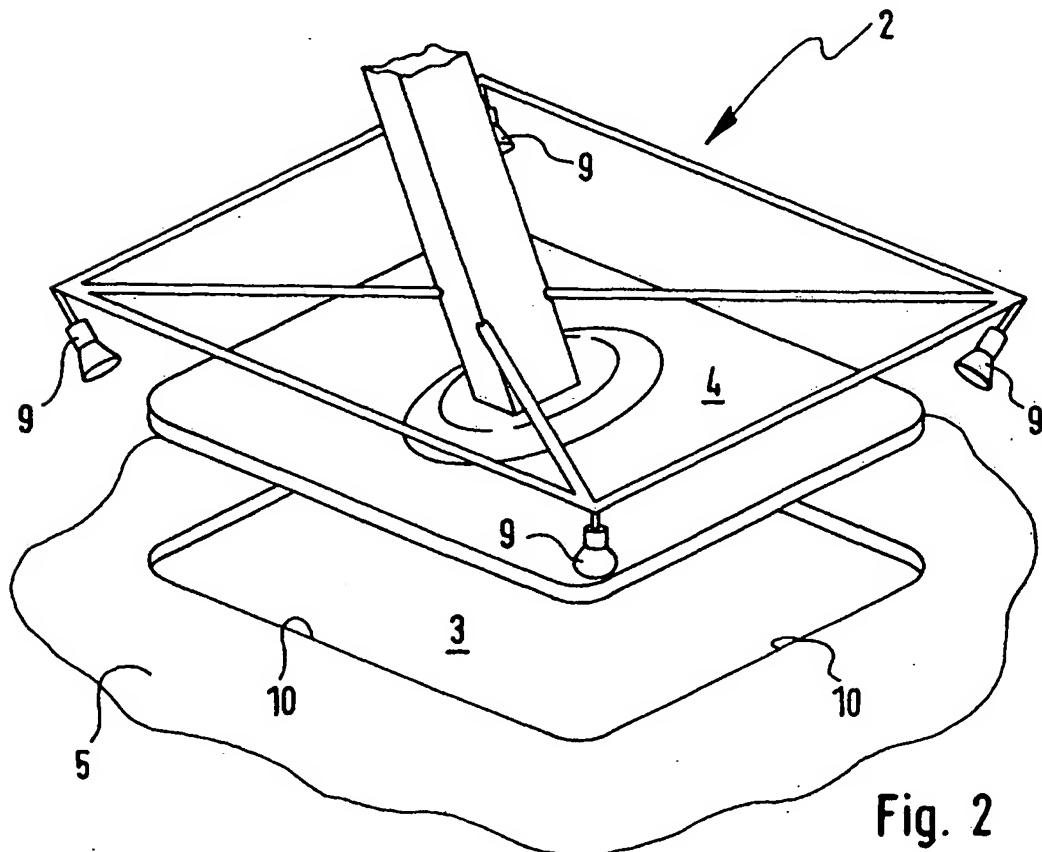
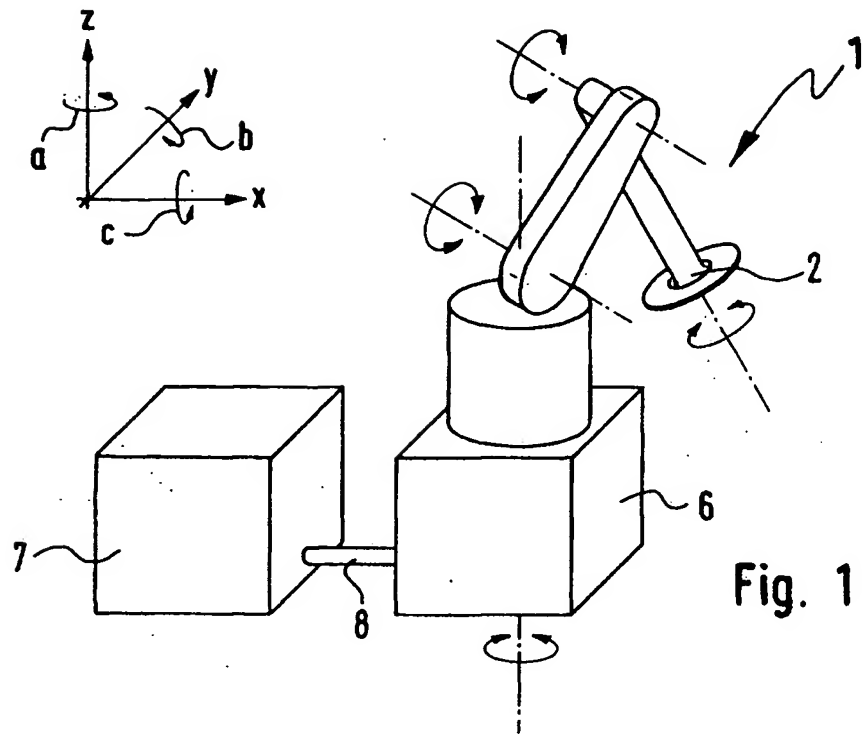
50

55

60

65





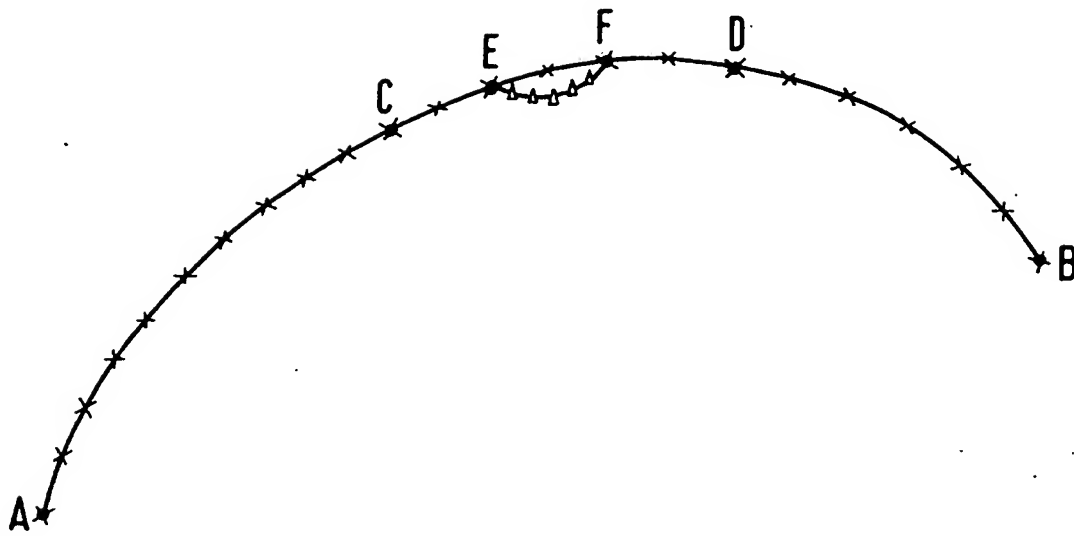


Fig. 3